

基于集合 Kalman 滤波的暂态电压扰动检测

江辉¹, 邹崇杰¹, 谢兴¹, 彭建春²

(1. 深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518061; 2. 深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518061)

摘要: 随着电力系统中非线性负荷的增加, 由暂态电压扰动引起的电能质量问题越来越严重, 对暂态电压扰动信号的检测成为改善电能质量的关键。基于集合 Kalman 滤波方法进行暂态电压扰动检测分析, 结合暂态电压扰动特点, 构造了集合 Kalman 滤波的背景集合。由 $k-1$, $k-2$ 时刻的电压状态修正值组成背景集合, 然后进行递归运算, 提取出实时的电压幅值, 从而定位暂态扰动发生的起止时刻以及跟踪突变的幅值。仿真结果表明, 所提方法能快速检测到电压暂降/突升、暂态电压脉冲信号发生的起止时刻, 跟踪到突变幅值。其对谐波加电压暂降混合扰动信号的扰动起止时刻以及混合扰动信号中基波、谐波的幅值的跟踪也非常有效。所提方法总体优于传统的 Kalman 滤波法和有效值法。

关键词: 电能质量; 暂态电压扰动; 集合 Kalman 滤波; 背景集合; 扰动起止时刻

Transient voltage disturbances detection based on Ensemble-Kalman filtering

JIANG Hui¹, ZOU Chong-jie¹, XIE Xing¹, PENG Jian-chun²

(1. College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China;

2. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China)

Abstract: With the increase of nonlinear loads in power system, power quality problems caused by transient voltage disturbance is more and more serious, the detection of transient voltage disturbance signal becomes the key to improve power quality. This paper proposes a transient voltage disturbance detection method based on Ensemble-Kalman filtering, the elements of Ensemble-Kalman filtering's background ensemble are reformed according to the characteristics of transient voltage disturbance. The modified values of voltage state at $k-1$ and $k-2$ form the background ensemble, then the real-time voltage's amplitude is obtained by recursive computation, thus the beginning and ending times of transient disturbances are positioned and abrupt amplitude is traced out. Simulation results show that the proposed method can quickly detect voltage's sag/swell, precisely position the beginning and ending times of transient voltage disturbance, and track down the abrupt amplitude. The proposed method is more effective than the traditional Kalman filter (KF) and root-mean-square (RMS) algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177102).

Key words: power quality; transient voltage disturbance; Ensemble-Kalman filtering; background ensemble; beginning and ending times of disturbance

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0038-07

0 引言

暂态电压扰动也称瞬态电压扰动, 是指电压受到暂态(瞬态)电压扰动发生畸变而引起电能质量污染的各种问题。暂态(瞬态)电压扰动一般包括三个方面, 暂态谐振, 瞬时电压上升或暂降, 暂态脉冲^[1]。

电压暂降(voltage sag), 是供电电压均方根值在短时间突然下降至额定电压幅值的90%~10%, 典型持续时间为0.5周波~1 min的一种现象。瞬时电压上升即电压突升(voltage swell), 是指电压的有效值升至额定值的110%~180%, 持续时间为0.5周波~1 min, 系统频率仍为标称值^[1]。电压暂态脉冲的持续时间更短, 一般为毫秒级。暂态电压扰动会造成操作失误或设备故障等问题, 造成巨大的经济损失。其中一些还伴随着人身安全的伤害, 为了减少其造成的损失, 必须对其进行有效的监测, 以便快速作出反应^[2-5]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177102); 深圳市基础研究计划项目(JCYJ20120613113140920、JCYJ20120817164050203)

国内外许多文献对暂态电压扰动检测进行了研究^[6-9]。文献[6]总结了一些常用的暂态电压扰动检测方法, 并提出了一种基于奇异值分解技术的暂态电压扰动检测方法。文献[7]则系统介绍了电压暂降的有效值检测法 (Rootmean square, RMS), 指出RMS适用于多种因素引起的电压暂降。文献[8]介绍了一种用于提取电压暂降特征量的半周期有效值法 (Half a cycle of RMS, HRMS), 该方法利用滑动半周期取值取代传统的周期取值, 部分改进了跟踪延迟的问题。文献[9]提出了一种结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法, 所提方法中小波变换兼具滤波效果, 减弱了低频暂降信号中的高频扰动成分, 从而提高能量算子的抗干扰性和计算精度。Kalman滤波法 (Kalman filtering, KF) 在电网电压模型已知的情况下, 能够准确计算基波和谐波分量, 其静止离散模型可以离线计算增益矩阵, 大大减少运算量。因此被广泛地应用于谐波检测和其他一些扰动检测中^[10-12]。文献[13]对Kalman滤波方法在电能质量分析中的应用进行了综述, 指出Kalman滤波适合单一频率指数幅值的信号和各种高频谐波的检测。文献[14]提出了一种基于Kalman滤波误差的电能质量扰动检测方法, 采用线性卡尔曼滤波器的误差序列来实时检测电能质量扰动。文献[15]提出了一种以周期样本协方差取代误差协方差的改进的Kalman滤波方法, 用于对电力信号中谐波的检测。但是存在样本的采集时间的延迟问题。卡尔曼滤波是基于线性系统提出的, 用于电能质量检测时, 存在对扰动发生时刻的定位延迟, 计算量大等问题。

集合Kalman滤波 (Ensemble kalman filtering, EnKF) 方法是将Kalman滤波与集合预报结合在一起的一种Kalman滤波方法。集合Kalman滤波通过集合采样克服了Kalman滤波模型参数协方差计算困难的问题, 同时具有处理高维非线性系统的能力, 从而被广泛应用到天气预报、森林面积预测等方面^[16-19]。文献[17-20]中用集合Kalman滤波方法对随机非线性高维数据进行了处理, 该方法能很好地识别跟踪离散数据的状态。另外, 由于集合Kalman使用的是随机信息集合而不是整个可见的完整数据集, 所以它的计算速度很快。暂态电压扰动信号具有很大的随机性, 分析含有谐波分量的暂态电压扰动信号时, 其计算矩阵的维度会很大。基于暂态电压扰动信号的特点和集合Kalman滤波方法的优点, 本文提出一种适用于暂态电压扰动信号检测的集合Kalman滤波方法。通过对集合Kalman的背景集合做适用于暂态电压信号的处理, 取 $k-1$ 时刻的修正电压状态值和 $k-2$ 时刻的修正电压状态值组合, 作为

k 时刻的背景集合, 计算 k 时刻的状态增益矩阵, 然后依次递归修正运算, 得到实时的电压幅值, 通过电压幅值判断暂态电压扰动发生的起止时刻并确定扰动的幅值。

1 集合 Kalman 滤波的基本原理

集合 Kalman 的本质是一种基于蒙特卡洛方法的 Kalman 滤波。有较高的计算效率以及能处理高维非线性系统的能力^[16-20]。其基本思想^[16-17]是, 初始化一组系统的状态采样作为背景集合, 利用观测信息, 通过卡尔曼滤波对背景数据集中的每个个体进行更新, 得到分析集合。分析集合用来估计状态的真实均值和方差。通过系统模型传递采样集合, 可以得到下一时刻的背景数据集。这样使用集合估计真实统计值, 提高了估计精度, 同时使计算量明显降低。

假设随机非线性离散方程为

$$x_k = f(x_{k-1}, w_{k-1}) \quad (1)$$

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (2)$$

式中: $x_k \in R^n$ 为状态变量; $z_k \in R^m$ 为观测变量; $w_k \in R^n$ 和 $v_k \in R^m$ 分别为系统噪声和量测噪声, 假设系统噪声和量测噪声为互不相关的两个零均值高斯噪声, 其方差阵分别设为 Q 和 R 。

定义集合 $X_k^b = \{x_{k,i}^b, i=1,2,\dots,n\}$ 为 k 时刻状态的背景集合, 它是由 $k-1$ 时刻的分析集合 X_{k-1}^a 传递而来, n 为集合样本数。其中传递矩阵为 A_k , 有

$$X_k^b = A_k X_{k-1}^a \quad (3)$$

背景集合的采样均值和方差有式 (4) 计算。

$$\bar{x}_k^b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{k,i}^b \quad (4)$$

$$P_k^b = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{k,i}^b - \bar{x}_k^b)(x_{k,i}^b - \bar{x}_k^b)^T \quad (5)$$

Kalman 的增益计算为

$$K_k = P_k^b H_k^T (H_k P_k^b H_k^T + R_k)^{-1} \quad (6)$$

式中, R_k 是 k 时刻的观测误差协方差矩阵。

但是一般不这样直接计算增益^[17], 重新定义为

$$K_k = P_{kh}^k (P_{hh}^k + R_k)^{-1} \quad (7)$$

其中

$$P_k^b H_k^T = P_{kh}^k = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{k,i}^b - \bar{x}_k^b)(h(x_{k,i}^b) - h(\bar{x}_k^b))^T \quad (8)$$

$$H_k P_k^b H_k^T = P_{hh}^k = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h(x_{k,i}^b) - h(\bar{x}_k^b))(h(x_{k,i}^b) - h(\bar{x}_k^b))^T \quad (9)$$

然后利用 k 时刻的观测值对背景集合进行更

新, 得到 k 时刻的分析集合 $X_k^a = \{x_{k,i}^a, i=1,2,\dots,n\}$ 为

$$x_{k,i}^a = x_{k,i}^b + \mathbf{K}_k (y_{k,i} - h(x_{k,i}^b)), i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

式中, $y_{k,i}$ 是 k 时刻的观测采样值集合。

然后以 k 时刻的分析集合作为 $k+1$ 时刻的背景集合去计算 $k+1$ 时刻的分析集合, 依次递归运算即可得到实时的系统状态集合, 从而得到完整的系统预测。

2 基于集合 Kalman 滤波暂态电压扰动检测

在做暂态电压扰动检测分析时, 需要对电压信号进行采样离散化, 这样就会产生大量数据。当存在谐波干扰的时候, 处理的维数会很高, 而且系统信号由于噪声的干扰等问题, 在一定范围内具有很大的随机性, 基于这些特点, 本文将集合 Kalman 滤波应用到暂态电压扰动检测分析中。

考虑一个无噪声离散化的单相电压信号

$$v(k) = E(k) \cos(\omega k \Delta t + \varphi) \quad (11)$$

式中: $k=1,2,3,\dots,N$, 为采样点数; $E(k)$ 为 k 时刻的电压幅值; ω 为角频率; Δt 为采样间隔; φ 为初始相位角。令

$$\begin{cases} x_{1,k} = E(k) \cos(\omega k \Delta t + \varphi) \\ x_{2,k} = E(k) \sin(\omega k \Delta t + \varphi) \end{cases} \quad (12)$$

则得到 $k-1$ 到 k 时刻的状态变量矩阵为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{k-1} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_k$, 状态传递矩阵 \mathbf{A}_k 为

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \cos(\omega \Delta t) & -\sin(\omega \Delta t) \\ \sin(\omega \Delta t) & \cos(\omega \Delta t) \end{bmatrix}$$

而观测变量矩阵可描述为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H} \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (14)$$

即得到量测转移矩阵 $\mathbf{H} = [1 \ 0]$, \mathbf{V}_k 为观测噪声矩阵。

由于单相的电压信号一般都是连续的正弦/余弦信号, 传统的集合 Kalman 主要是运用在非线性随机离散系统领域。考虑到单相电压信号在某一时刻取值是唯一的, 为将集合 Kalman 方法运用到电压信号的检测当中, 本文对计算时使用的背景集合进行构造。其 k 时刻的背景集合 $X_k^b = \{x_{k,i}^b, i=1,2\}$ 由 $k-1$, $k-2$ 时刻的修正的电压状态矩阵 \mathbf{X}_{k-1} 、 \mathbf{X}_{k-2} 组成。即 $X_k^b = \{\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{X}_{k-2}\}$ 。然后由式(4)、式(7)~式(9)得到 k 时刻的 Kalman 滤波过程的增益矩阵 \mathbf{K}_k 。这样得到的 \mathbf{K}_k 能很好地反应 $k-1$ 时刻电压状态值与 $k-2$ 时刻状

态值的异常。如果在 $k-1$ 时刻电压发生突变, 那么 \mathbf{K}_k 值相较 \mathbf{K}_{k-1} 、 \mathbf{K}_{k-2} 等时刻的值就会产生突变, 这就为我们能及时检测电压扰动的发生时刻提供了高效、及时的保障, 使得我们可以在 1~2 个采样间隔左右跟踪电压波动。

预测 k 时刻状态矩阵为

$$\mathbf{X}_{k/k-1} = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{k-1} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{X}_{k/k-1}$ 是在 $k-1$ 时刻对 k 时刻状态的预测。利用 k 时刻的观测电压值对该预测状态进行修正, 得到 k 时刻的修正状态矩阵为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (y_k - \mathbf{H} \mathbf{X}_{k/k-1}) \quad (16)$$

式中, y_k 是 k 时刻的观测电压采样值。

\mathbf{K}_k 能及时反应电压的波动情况, 这就保证了我们得到的修正值和真实值之间的误差最小化。

然后再以此状态矩阵去更新 $k+1$ 时刻的背景集合, 经过式(4)、式(7)~式(9)、式(16)得到 $k+1$ 时刻电压状态值。以此递归得到完整的电压信号状态矩阵集。

得到 k 时刻修正电压信号状态矩阵后, 由式(17)、式(18)计算得到 k 时刻的电压信号幅值和相位角。

$$E(k) = \sqrt{x_{1k}^2 + x_{2k}^2} \quad (17)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{x_{2k}^2}{x_{1k}^2} \right) \quad (18)$$

计算 k 时刻的电压幅值的流程图如图 1 所示。

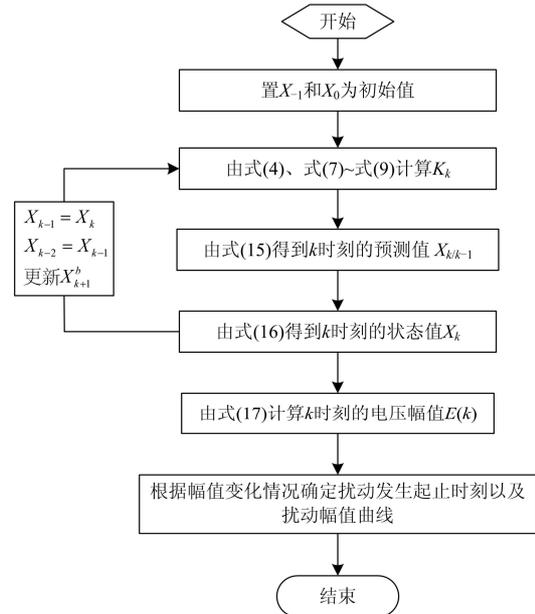


图 1 k 时刻的电压幅值计算流程图

Fig. 1 Block diagram used for voltage amplitude computing

对于含有谐波的暂态电压扰动信号的处理只需增加运算矩阵的维度。

3 算法仿真与分析

本文采用 Matlab2007 版进行仿真, 信号采样频率为 $f_s=10$ kHz, 采样间隔 $\Delta t=0.1$ ms, 基波频率 $f=50$ Hz。基波幅值采用标么值 1.0 p.u.。并将本文所提方法 EnKF 与 KF, HRMS 做了比较。

3.1 单一电压暂降信号的仿真与分析

单频率电压暂降信号可描述为

$$y(t) = E \cos(2\pi ft + \varphi) + v(t)$$

$$E = \begin{cases} 0.5 & 0.05 \text{ s} \leq t \leq 0.12 \text{ s} \\ 1 & 0 \leq t < 0.05 \text{ s}, 0.12 \text{ s} < t \leq 0.15 \text{ s} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $v(t)$ 为 $SNR=30$ dB 的高斯白噪声。电压暂降发生持续时间为 0.05~0.12 s (采样点的 500~1 200 点)。电压跌落幅值为 0.5 p.u.。初始相位角 $\varphi=0$ 。

图 2(a)所示为电压暂降故障波形图。图 2(b)所示为用三种方法跟踪得到的电压幅值图。图 2(c)为暂降发生时刻跟踪的效果放大图。表 1 为三种方法对于突变起止时刻以及突变幅值的跟踪时间的综合统计表。

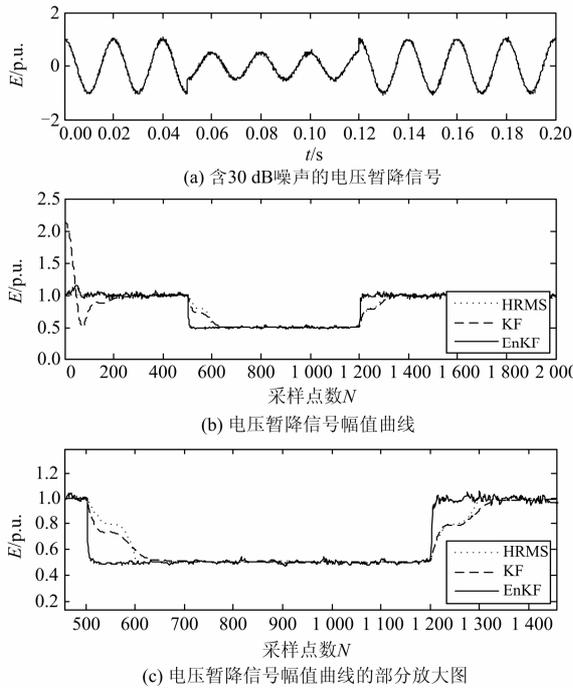


图 2 电压暂降信号及其幅值图

Fig. 2 Amplitude curve of voltage sag

分析图 2(b)、图 2(c), 可以看到 EnKF 对于暂降的起止时刻和暂降的幅值的跟踪明显要比 KF 和 HRMS 好。对于暂降发生时刻, 三种方法都能在 1~2

个采样间隔 (0.2 ms 左右) 做出反应。对于暂降幅值的跟踪 KF 需要 120 个左右采样点 (12 ms 左右), HRMS 需要 100 采样点 (10 ms 左右), 而 EnKF 能在 15 个左右的采样间隔 (1.5 ms 左右) 就能跟踪到暂降的幅值。

表 1 三种方法跟踪时间比较

Table 1 Tracking time comparison of three methods

方法	暂降发生所需时间(幅值<0.9 p.u.)	暂降幅值(95%以上的稳定度)	暂降终止所需时间(幅值>0.1 p.u.)
KF	0.8 ms	12 ms	9.5 ms
HRMS	1.7 ms	10 ms	8.5 ms
EnKF	0.3 ms	1.5 ms	0.5 ms

综合图 2、表 1, 可以看出, EnKF 对单一电压暂降信号的跟踪和定位要优于 KF 和 HRMS 方法。

3.2 暂态电压脉冲信号的仿真与分析

暂态电压脉冲由于其发生的时间非常短暂等原因, 其发生的时间以及幅值很不好跟踪, 运用本文所提方法对其进行研究。一单频率电压脉冲信号可由式 (20) 描述。

$$y(t) = \begin{cases} \cos(2\pi ft + \varphi) + 0.5e^{-10t} & 0.0803 \text{ s} \leq t \leq 0.0823 \text{ s} \\ \cos(2\pi ft + \varphi) & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

脉冲发生在 0.0803~0.0823 s (采样点的 803~823 点之间) 之间, 经计算得到脉冲发生时间段内最大脉冲理论值为 1.26 p.u.。初始相位角 $\varphi=0$ 。其波形图如图 3(a)所示。

图 3(b)是对暂时电压脉冲信号的跟踪情况的局部放大图示。表 2 为三种方法对该暂态电压脉冲跟踪的效果比较。

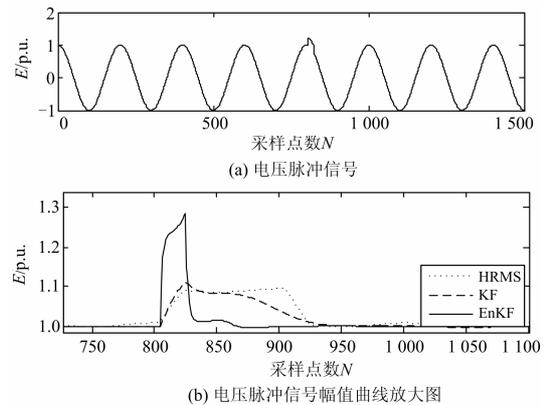


图 3 电压脉冲信号及其幅值曲线

Fig. 3 Amplitude curve of voltage pulse

从图 3(b)可以得出, 对于暂态电压脉冲信号幅值的跟踪, EnKF 得到的幅值为 1.29 pu, 明显要比

KF (1.11 pu) 和 HRMS (1.09 pu) 准确。其对于脉冲发生的起止时刻跟踪也更加快速。

表 2 暂态电压脉冲的三种跟踪方法比较

Table 2 Comparison for voltage pulse of three methods

方法	起始采样点数	最大幅值/p.u.	终止采样点数
KF	805	1.11	918
HRMS	804	1.09	922
EnKF	805	1.29	835

从表 2 中的数据比较来看, 可以直观地得出结论。1) 三种方法对于脉冲的发生都能做出及时反应, 反应时间在 1~2 采样间隔 (0.1~0.2 ms)。2) EnKF 跟踪的脉冲发生持续时间是 30 个采样间隔, KF 是 113 个采样间隔, HRMS 则是 118 个采样间隔, 理论值是 20 个采样间隔, EnKF 更接近理论值。3) 对于脉冲信号的幅值跟踪, EnKF 跟踪得到的最大幅值是 1.29 p.u., KF 是 1.11 p.u., HRMS 则是 1.09 p.u., 脉冲的最大幅值是 1.26 p.u., EnKF 的跟踪误差最小。

综合以上分析可以看出, 对暂态电压脉冲信号的跟踪, KF 和 HRMS 已经无法提供有效电压特征量, EnKF 优势明显。

3.3 谐波加电压暂降信号的仿真与分析

电压信号中不只有基波信号, 通常含有大量的谐波信号, 含谐波加电压暂降的混合扰动信号可以描述为

$$y(t) = \{1 - 0.6[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \cos(2\pi ft + \varphi_1) + [u(t-t_3) - u(t-t_4)] \{0.23 \cos(6\pi ft + \varphi_3) + 0.13 \cos(10\pi ft + \varphi_5)\} \quad (21)$$

其中: 3 次谐波含量 23%, 5 次谐波含量 13%, φ_1 、 φ_3 、 φ_5 为初始相位角, 本文都设定为 0° ; t_1 、 t_2 表示基波电压暂降发生的起止时刻; t_3 、 t_4 为谐波扰动发生的起止时刻。

仿真试验中, 令 $t_1=0.08$ s、 $t_2=0.12$ s、 $t_3=0.04$ s、 $t_4=0.16$ s。即电压暂降发生于采样点的 800~1 200 点之间, 谐波扰动发生于采样点的 400~1 600 点之间。基波电压跌落幅值为 0.4 p.u.。波形图如图 4(a) 所示。

利用本文方法对式(21)描述的电压信号进行处理, 图 4(b)展示三种方法对混合扰动信号中基波幅值的跟踪情况。图 4(c)展示三种方法对混合扰动信号中 3 次谐波幅值的跟踪情况。图 4(d)展示三种方法对混合扰动信号中 5 次谐波幅值的跟踪情况。从图 4(b)~图 4(d)我们可以看出:

(1) 对混合扰动信号中电压暂降信号的突变幅

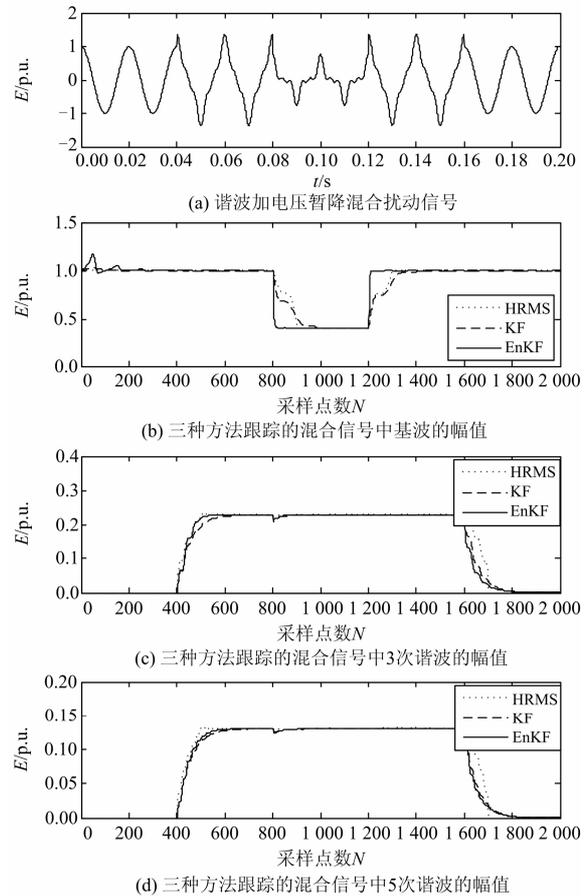


图 4 谐波加电压暂降信号及幅值曲线

Fig. 4 Amplitude curve of harmonic & voltage sag

值的跟踪, EnKF 大约需要 15 个采样间隔(1.5 ms)就能达到稳定, KF、HRMS 都需要 100 多个采样间隔(10 ms)才能稳定。从图 4(b)可以看出, 对于电压暂降突变起止时刻的定位 EnKF 也很精准, 相对于 KF、HRMS 优势明显。

(2) 对混合扰动信号中谐波信号的跟踪, 三种方法基本都能快速确定谐波发生起止时刻; 对于谐波幅值的跟踪 EnKF 需要 150 个采样间隔(15 ms)、KF 需要 200 个采样间隔(20 ms)、HRMS 需要 100 个采样间隔(10 ms)达到稳定。

综合而言, 对于混合扰动中基波、谐波的突变起止时刻以及突变幅值的跟踪, EnKF 优于 KF、HRMS, 可以满足我们对混合扰动检测定位的及时性、精准性的要求。

4 结论

本文提出一种基于集合 Kalman 滤波的暂态电压扰动检测的新方法。对集合 Kalman 滤波运算过程中的背景集合进行适用于电压信号的处理, 由

$k-1$, $k-2$ 时刻的修正的电压状态矩阵 X_{k-1} 、 X_{k-2} 组成背景集合, 然后对电压暂降信号、暂态电压脉冲信号以及谐波加暂降电压信号进行了仿真分析。可以得出以下结论。

(1) 本文方法适用于对暂态电压扰动信号的检测, 能很好地跟踪到电压暂降、暂态电压脉冲这两类电压扰动发生的起止时刻以及扰动幅值, 检测精度高。

(2) 本文方法对于谐波与电压暂降混合扰动信号中基波、谐波信号的跟踪较理想, 可以及时检测到扰动发生的起止时刻。对于谐波信号幅值的跟踪值得进一步研究。

(3) 经过反复试验, 该方法总体优于 KF、HRMS。但也存在不足之处, 其在对电压信号幅值进行跟踪时, 对于初始值的选取比较敏感, 如何选取合适的初始值以及将该种方法适用到更加复杂环境下, 将是进一步研究的重点。

参考文献

- [1] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
CHEN Hao-zhong, AI Qian, ZHANG Zhi-gang, et al. Quality of electric energy[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 张永平, 李鹏, 白茜, 等. 考虑衰减直流分量的动态电压恢复器补偿量的直接检测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 66-70.
ZHANG Yong-ping, LI Peng, BAI Qian, et al. Direct detection of compensation signal for dynamic voltage restorer considering decaying DC component[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 66-70.
- [3] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR 电压暂降检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 234-239.
QU Shuo, HUANG Chun, JIANG Ya-qun, et al. A new detection method of voltage sag applied in DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 234-239.
- [4] 林焱, 吴丹岳, 章雪萌, 等. 电压暂降指标的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 147-152.
LIN Yan, WU Dan-yue, ZHANG Xue-meng, et al. An exploration on index about voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 147-152.
- [5] 张波, 颜湘武, 王树岐. 基于 dq 变换的三相电压暂降生成方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 55-61.
ZHANG Bo, YANG Xiang-wu, WANG Shu-qi. Method of three-phase voltage sag forming based on dq transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 55-61.
- [6] 秦英林, 田立军. 短时电压扰动检测与定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 21-24, 30.
QIN Ying-lin, TIAN Li-jun. A new method to detect and locate instantaneous voltage disturbances[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 21-24, 30.
- [7] DING Ning, CAI Wei, SUO Juan, et al. Voltage sag disturbance detection based on RMS voltage method[C] // Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific. Wuhan, China: IEEE Conference Publications, 2009: 1-4.
- [8] 王效孟, 周勇, 刘继承, 等. 检测电压暂降特征量的有效值算法[J]. 低压电器, 2010(10): 48-51.
WANG Xiao-meng, ZHOU Yong, LIU Ji-cheng, et al. Detection method of voltage sags characterizations using RMS algorithm[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(10): 48-51.
- [9] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.
LU Bo-yong, HUANG Wen-qing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 171-177.
- [10] SCHWARTZENBERG J W, NWANKPA C O, FISCHL R, et al. Prediction of distribution system disturbances[C] // Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record, 25th Annual IEEE, Taipei, 1994, 2: 1077-1082.
- [11] 李功新, 田文俊, 薛尚青, 等. 动态电压恢复器的无迹卡尔曼滤波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 127-132.
LI Gong-xin, TIAN Wen-jun, XUE Shang-qing, et al. Detection for dynamic voltage restorer based on unscented Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 127-132.
- [12] MOSTAFA M A. Kalman filtering algorithm for electric power quality analysis: harmonics and voltage sags problems[C] // IEEE Power Engineering, 2007 Large Engineering Systems Conference, IEEE Conference

- Publications, Montreal, Que, 2007: 159-165.
- [13] 于静文, 薛蕙, 温渤婴. 基于卡尔曼滤波的电能质量分析方法综述[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 97-103.
YU Jing-wen, XUE Hui, WEN Bo-ying. A survey on Kalman filtering based methods for power quality analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 97-103.
- [14] 张静, 徐政. 基于卡尔曼误差的电能质量扰动检测[J]. 电力系统及自动化学报, 2006, 18(5): 25-30.
ZHANG Jing, XU Zheng. Power quality disturbances detection based on Kalman filter residuals[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5): 25-30.
- [15] RAY P K, SUBUDHI B. Ensemble-Kalman-filter-based power system harmonic estimation[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE, 2012, 61(12): 3216-3224.
- [16] LI Yu-lan, HUANG Zhen-yu, ZHOU Ning, et al. Application of ensemble Kalman filter in power system state tracking and sensitivity analysis[C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, IEEE Conference Publications, Orlando, FL, 2012: 1-8.
- [17] 杜航原, 郝燕玲, 赵玉新. 基于集合卡尔曼的改进粒子滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7): 1653-1657.
DU Hang-yuan, HAO Yan-ling, ZHAO Yu-xin. Improved particle filter based on Ensemble Kalman filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(7): 1653-1657.
- [18] 吴国灿, 郑小谷, 李勇. 非线性观测算子的集合卡尔曼滤波的改进[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(6): 671-674.
WU Guo-can, ZHENG Xiao-gu, LI Yong. Improvement on Ensemble Kalman filter of nonlinear observational operator[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(6): 671-674.
- [19] 刘成思, 薛纪善. 关于集合 Kalman 滤波的理论和方法的发展[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 628-633.
LIU Cheng-si, XUE Ji-shan. The Ensemble Kalman filter theory and method development[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(6): 628-633.
- [20] CURN J, MARINESCU D, LACEY G, et al. Estimation with non-white gaussian observation noise using a generalised Ensemble Kalman filter[C] // Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2012 IEEE International Symposium on, IEEE Conference Publications, Magdeburg, 2012: 85-90.

收稿日期: 2013-10-16; 修回日期: 2013-12-03

作者简介:

江辉(1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电网络分析、电能质量检测与控制等; E-mail: huijiang@szu.edu.cn

邹崇杰(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析;

谢兴(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析。